

УДК 550.34.01,699.842

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ БАРЬЕРОВ В ГРУНТЕ

© 2020 г. В. А. Макеев¹, Р. А. Жостков², *

¹Государственное бюджетное образовательное учреждение
“Школа на Юго-Востоке имени Маршала В.И. Чуйкова”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли
имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: shageraxcom@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Выполнено численное параметрическое исследование рассеяния излучения сейсмических вибраторов на сейсмических барьерах и показано, что они могут быть эффективны не только для экранирования поверхностных волн, но и для фокусировки объемных, повышая поток механической энергии в десятки раз, что может быть полезным как для глобального вибропросвечивания Земли, так и при вибросейсмическом воздействии на нефтяные месторождения для повышения объемов добычи трудно извлекаемых углеводородов.

DOI: 10.31857/S0367676520020234

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее точные данные о глубинном строении Земли получают при анализе телсейсмических сигналов от землетрясений. Благодаря подобным исследованиям были определены границы земных оболочек и их свойства, в частности, скорости распространения объемных волн [1]. К сожалению, такой подход осложнен тем фактом, что невозможно контролировать такие параметры, как время землетрясения, положение источника, спектральный состав, в отличие от вибросейсмических источников при активной сейсмологии [2]. Такие источники позволяют реализовать повторяемое длительное воздействие на земную поверхность, что дает возможность получения исходных сейсмологических данных совсем другого качества нежели землетрясения. Возможность длительного накопления сигнала, излучаемого сейсмическим вибратором, позволяет отчасти компенсировать его малую мощность по сравнению с землетрясением, однако, даже в этом случае доступные для зондирования расстояния относительно невелики.

Глобальное вибропросвечивание Земли с использованием мощных контролируемых источников сейсмических волн представляет собой сложную и амбициозную задачу, требующую повышения эффективности сеймовибраторов помимо увеличения их абсолютной мощности. Известно [2], что около 70% энергии сейсмических

вибраторов излучается в виде поверхностных акустических волн. Это полезно для многих геофизических задач, особенно при инженерных исследованиях, поскольку существуют эффективные методы геофизических исследований [3, 4], использующие амплитудные и фазовые данные о поверхностных волнах и хорошо зарекомендовавшие себя в полевых исследованиях [5–10]. Однако для глобального зондирования Земли это представляется нерациональным, поскольку в этом случае используются объемные волны, проникающие в глубинные области Земли. Заманчивой идеей выглядит перераспределение излучаемой сейсмическим вибратором энергии от поверхностных волн к объемным. Это можно реализовать с помощью сейсмических барьеров, под которыми обычно понимают либо открытые, либо заполненные материалом траншеи прямоугольной формы [11]. Реже рассматривают иную форму траншей либо просто неровную границу, на которой происходит рассеяние поверхностных акустических волн [12, 13]. Одним из частных случаев заполненных траншей можно считать свайные поля [14, 15], которые проще в изготовлении и имеют схожие характеристики. Помимо траншей эффективное экранирование поверхностных акустических волн возможно с применением естественных склонов [16] или насыпей [17, 18].

Многие работы, в которых приведены результаты теоретических расчетов [19], физических

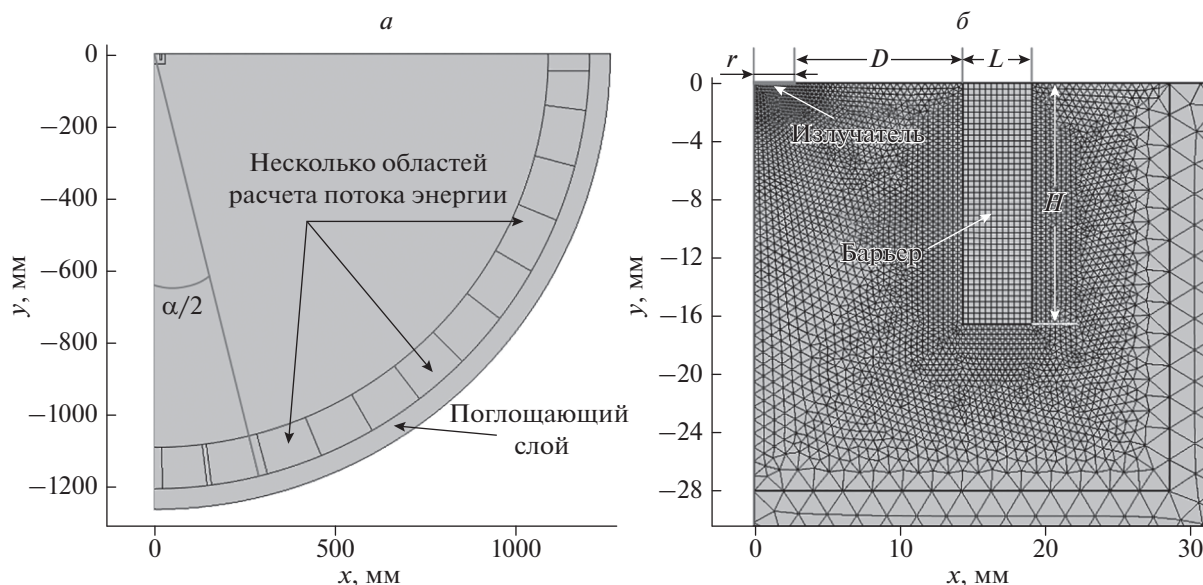


Рис. 1. Геометрия модели: а – общий вид; б – область вблизи источника.

экспериментов [12, 20] и численного моделирования [12, 14, 15, 20–22] сводятся к исследованию рассеяния поверхностных акустических волн от излучателя типа вертикального штампа, расположенного вне сейсмического барьера. Обобщенную цель этих исследований можно сформулировать как поиск физических и геометрических параметров, при которых происходит наиболее эффективное рассеяние поверхностных акустических волн для защиты объектов инфраструктуры от разрушающего воздействия землетрясений [22], поскольку именно эти волны обычно приводят к наиболее существенным разрушениям.

Однако экранирующий эффект можно использовать и противоположным способом – вместо того, чтобы не допустить проникновение поверхностных волн внутрь защищаемой зоны, можно ограничить ее излучение вне этой зоны сейсмическим вибратором, расположенном внутри нее. Поэтому цель нашего исследования заключается в определении условий, при которых максимизируется излучение объемных волн в заданном направлении. И в этом случае не всегда наиболее подходящее решение для эффективного экранирования поверхностных акустических волн будет приводить к максимальному излучению объемных волн в заданном направлении.

В научной литературе в основном уделяется внимание рассмотрению вертикальных сейсмических барьеров, гораздо слабее изучены горизонтальные барьеры. В настоящей работе исследован широкий диапазон соотношений ширины и глубины барьера, включая переходные варианты, а также различные материалы сейсмических барьеров.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Численное моделирование методом конечных элементов проведено с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics 5.4 (лицензия № 9600341). В нем реализован двумерный расчет распространения поверхностных и объемных волн от сейсмического вибратора, окруженного барьером. Геометрия модели, а именно концентрическое расположение кольцевого сейсмического барьера вокруг круглого излучателя, позволила использовать ось симметрии (при нулевой горизонтальной координате) и решать трехмерную задачу в плоской постановке (рис. 1). Отметим, что такой подход невозможен в случае исследования экранирующих свойств сейсмических барьеров, поскольку в подобных исследованиях моделируется рассеяние плоской волны на кольцевом барьере, что приводит к необходимости решать задачу в полноценной трехмерной постановке. Это требует значительных вычислительных и временных ресурсов и объясняет небольшое количество исследуемых комбинаций параметров модели. Радиус вибратора во время исследований был фиксирован ($r = 2.5$ м), что соответствует существующим моделям [2]. Варьируемыми геометрическими параметрами при исследовании были: глубина барьера H , его ширина L и расстояние между краем вибратора и внутренней границей барьера D . Линейные размеры в исследуемой модели нормированы на длину волны Рэлея λ_R с частотой 7 Гц, которая для используемых параметров вмещающей среды (см. табл. 1) составляет 23.6 м.

Области, в которых рассчитывали усредненный поток волновой энергии, находятся в даль-

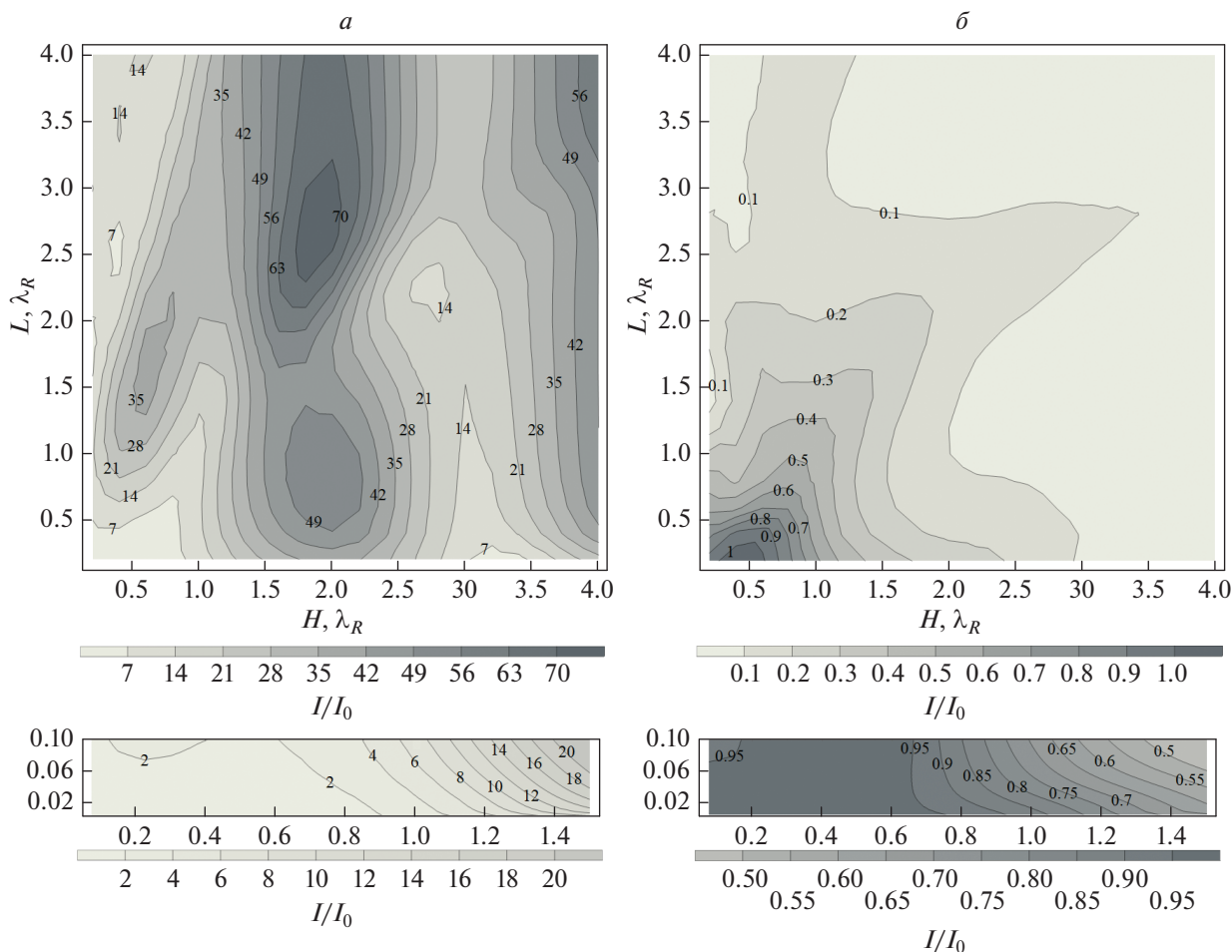


Рис. 2. Зависимость относительного изменения потока энергии от геометрических размеров сейсмического барьера при $D = 1.3\lambda_R$: *a* – для объемных волн; *б* – для поверхностной волны. В нижней части показаны технологически интересные области в увеличенном масштабе.

ней зоне и соответствуют шаровым секторам с вертикальной осью для набора центральных углов α . В настоящей работе приведены результаты (рис. 2) для $\alpha/2 = 13.8^\circ$, поскольку под этим углом выходит продольная упругая волна, касающаяся внешней границы земного ядра в соответствии с моделью PREM [1], таким образом, волновая энергия, излучаемая под меньшими углами, будет

проходить через ядро Земли, позволяя осуществить его зондирование.

Размер конечных элементов обеспечивает ошибку не более 0.5%, причем не превышает 1/8 длины волны Рэлея, а в области вблизи вибратора и барьера меньше их характерных размеров в 10 раз (рис. 1б). Расчеты проводили в частотной области, поскольку нас интересовали

Таблица 1. Параметры барьера и вмещающей среды

Тип среды	Параметр		
	плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	скорость продольной волны, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	скорость поперечной волны, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Вмещающая среда	1600	400	180
Бетонный барьер	2400	4000	2450
Песчаный барьер	2000	1800	540
Водный барьер	1000	1500	—

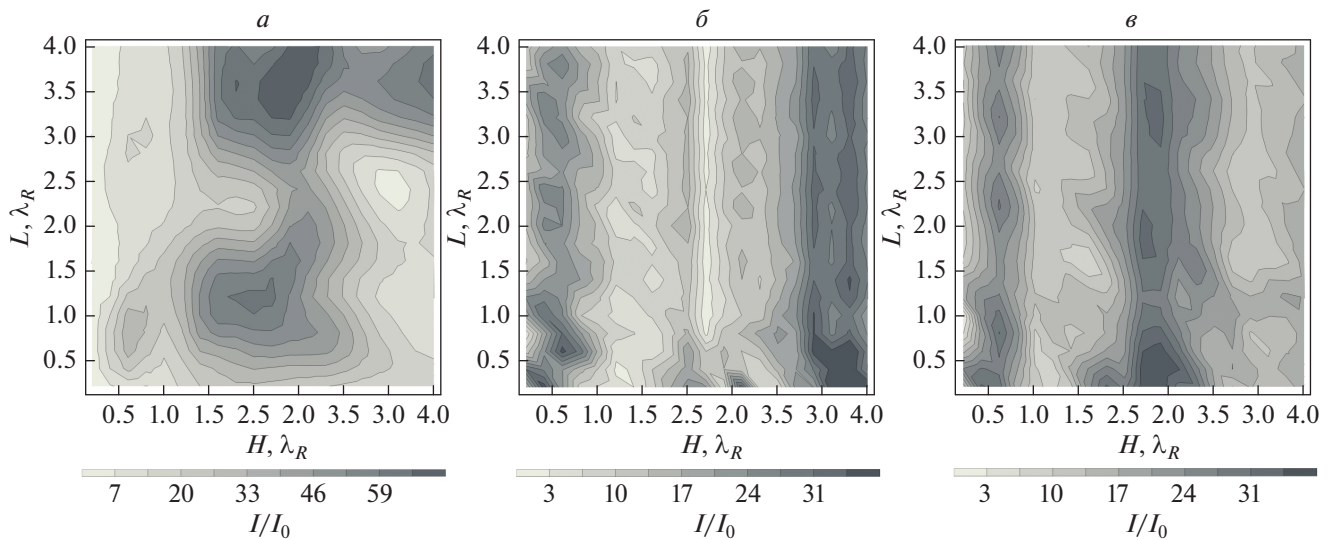


Рис. 3. Зависимость относительного изменения потока энергии от геометрических размеров сейсмического барьера при $D = 1.3\lambda_R$ для объемных волн: *а* – песчаный барьер; *б* – водный барьер; *в* – открытый барьер.

лишь значения потока волновой энергии в различных шаровых секторах при параметрическом исследовании. Для каждого материала барьера (см. табл. 1) и расстояния D проводили 400 реализаций – для каждой комбинации из 20 значений ширины L и глубины H барьера.

Граничные условия соответствуют стандартным для подобных задач: слева условие осевой симметрии, позволяющее решать трехмерную задачу в двумерной постановке; с внешней (округлой) стороны модель окружена идеально согласованным поглощающим слоем со слабоотражающей внешней границей, что практически полностью исключает отражения от границы модели. Дневная поверхность – свободная за исключением области приложения вертикальной гармонической силы (отрезок длиной r у оси симметрии) с частотой 7 Гц (типичная частота вибросейсмического воздействия [2]), соответствующей сейсмическому вибратору; между областями из разных материалов действует условие непрерывности смещений и напряжений (нормальных в случае границы твердое тело–жидкость, в случае открытого барьера его границы свободные). Результат численного моделирования представляет собой таблицы, содержащие значения усредненных потоков энергии I/I_0 в различных шаровых секторах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные в результате численного моделирования данные были обработаны с помощью специального алгоритма, заключавшегося в нормировании значений потоков энергии I на соответствующие величины в случае однородной сре-

ды (в отсутствие барьера) I_0 . Полученные данные легли в основу построения распределения относительного изменения потока энергии от геометрических размеров используемого барьера (рис. 2).

Пример, приведенный на рис. 2, показывает, что бетонный барьер может повысить эффективность излучения сейсмического вибратора на два порядка, если его ширина будет около 40 м, а глубина – около 60 м. Разумеется этот результат носит сугубо фундаментальный характер, поскольку реализовать подобный барьер практически невозможно. Примечательно, что даже относительно тонкие (толщиной всего 2% от длины поверхностной волны) могут быть эффективными, и если ограничиться барьером с технически реализуемыми параметрами, то можно ожидать усиление излучения в 20 раз при ослаблении поверхностных волн в 3 раза (по энергии).

Для тех же значений $D = 1.3\lambda_R$ и $\alpha = 27.6^\circ$, но других материалов, были получены аналогичные распределения относительного увеличения энергии объемных волн в зависимости от ширины и глубины барьеров (рис. 3). Подобные результаты свидетельствуют не только о перспективном использовании барьеров для задач геофизического зондирования, а также для повышения эффективности вибросейсмического воздействия на нефтяные залежи с целью увеличения добычи. Сравнивая результаты, представленные на рис. 3, можно сделать закономерный вывод о том, что эффективность сейсмического барьера возрастает при увеличении контраста акустических импедансов между материалом барьера и вмещающей среды. Даже узкие открытые или водные барьеры весьма эффективно экранируют поверхностные

волны, поскольку фактически представляют собой разрыв сплошности среды, причем, их эффективность практически не зависит от ширины. К сожалению, реализация открытых и водных барьеров на практике затруднена, поскольку велика вероятность обрушения подобной конструкции при использовании мощного сейсмического источника, поэтому сплошные барьеры из твердых материалов (или свайные поля) выглядят более практичными.

Подтверждены прежние результаты, что наиболее эффективно экранируют поверхностные волны барьеры с характерным размером около одной длины волны Рэлея [22]. Новым же является то, что использование горизонтальных барьеров может быть более выгодным, чем вертикальных, во-первых, из-за того, что их изготовление проще технологически, а, во-вторых, что для достижения того же уровня защиты в ряде случаев, требуется меньший по размеру барьер, тем не менее необходимо учитывать, что при одинаковом сечении LH горизонтальный барьер имеет больший объем.

Полученные результаты демонстрируют существенно нелинейный характер зависимости эффективности барьера от его параметров, поэтому для условий конкретного места предполагаемой установки сейсмического вибратора, окруженного барьером, необходимо проведение крупного параметрического исследования с варьированием как геометрических, так и физических параметров модели, в том числе и использование композитных материалов.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-10162).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. V. 25 № 4. P. 297.
2. *Алексеев А.С., Геза Н.И., Еманов А.Ф. и др.* Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. 2004. 387 с.
3. *Горбатилов А.В.* Способ сейсморазведки. Пат. РФ № 2271554, кл. G01V1/00. 2006.
4. *Яновская Т.Б.* Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб: Наука, 2015. 167 с.
5. *Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А. и др.* // Вулк. и сейсм. 2017. Т. 11. № 6. С. 28; *Likhodeev D.V., Dudarov Z.I., Zhostkov R.A. et al.* // J. Volcanology Seismology. V. 11. № 6. С. 413.
6. *Преснов Д.А., Белобородов Д.Е., Долов С.М. и др.* // Тез. докл. науч. конф. молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. (Москва, 2016). С. 54.
7. *Собисевич А.Л., Жостков Р.А.* // Геофиз. иссл. 2013. Т. 14. № 4. С. 47.
8. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Котов А.Н.* // Сборник научных материалов двадцатой молодежной научной школы по геофизике. (Пермь, 2019). С. 157.
9. *Собисевич А.Л., Тверитинова Т.Ю., Лиходеев Д.В. и др.* // Вопр. инж. сейсмол. 2015. Т. 42. № 2. С. 73.
10. *Французова В.И., Данилов К.Б.* // Вулк. и сейсм. 2016. № 5. С. 71–78; *Frantsuzova V.I., Danilov K.B.* // J. Volcanology Seismology. 2016. V. 10. № 5. P. 339.
11. *Сапарлиев Х.М.* // Наука и современность. Сб. Матер. ЛП Междун. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 2017). С. 118.
12. *Klein R., Antes H., Le Houe'dec D.* // Comput. Struct. 1997. V. 64 P. 809.
13. *Shen J., Maradudin A.A.* // Phys. Rev. B. 1980. V. 22. Art. № 4234.
14. *Дудченко А.В.* // Сейсмостойкое строит. Безопасн. сооруж. 2017. № 5. С. 47.
15. *Gao G., Li Z.Y., Qiu Ch., Yue Z.* // Soil Dynam. Earthquake Engin. 2006. V. 26. P. 1015.
16. *Ляпин А.А., Селезнев Н.М., Шиялева О.В.* // Эколог. вестн. науч. центров ЧЭС. 2008. № 2. С. 45.
17. *Жостков Р.А., Собисевич А.Л.* // ДАН. 2018. Т. 481. № 4. С. 438.
18. *Жостков Р.А.* // Изв. РАН Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1555; *Zhostkov R.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 82. № 11. P. 1416.
19. *Hildebrand R.* // Soil Dynam. Earthquake Engin. 2003. V. 23. P. 143.
20. *Coulier P., Cuéllar V., Degrande G. et al.* // Soil Dynam. Earthquake Engin. 2015. V. 77. P. 238.
21. *Орехов В.В., Негэхдар Х.* // Вестн. МГСУ. 2013. № 3. С. 98.
22. *Kuznetsov S.V.* // Acoust. Phys. 2011. V. 57. № 3. P. 420.